

# 飞轮电池模糊控制策略研究

张云聪,谢振宇,程伟超,郝建胜

(南京航空航天大学 直升机传动技术重点实验室,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对飞轮电池工作转速高、越过临界转速时转子振动大以及系统的非线性和控制参数不确定性等特点,开发了模糊自调整PID控制策略,实现了控制参数的在线调整。运用MATLAB模糊逻辑控制工具箱设计模糊控制规则,运用Simulink实现了不完全微分PID和模糊自调整PID控制策略仿真,分析对比了两种控制策略对系统动态性能的影响。在Quartus II平台搭建了模糊PID控制模块,利用EP4CE22 FPGA控制板在飞轮电池试验台上实现了飞轮转子的稳定运行。仿真和试验结果均表明,模糊自调整PID控制对转子的振动具有较好的抑制作用,提高了飞轮系统的动态性能。

**关键词:**模糊控制;PID控制;FPGA;MATLAB/Simulink

**中图分类号:**TP273+.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)04-0149-05

## Research on Fuzzy Control Strategy Based on FPGA Controller

ZHANG Yuncong, XIE Zhenyu, CHENG Weichao, HAO Jiansheng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of high operating speed of flywheel battery, high rotor vibration at critical speed and system nonlinearity and uncertain control parameters, a fuzzy self-adjusting PID control strategy is developed, and the on-line adjustment of control parameters is realized. The fuzzy control rules are designed by using the fuzzy logic control toolbox of MATLAB, and the simulation of incomplete differential PID and fuzzy self-adjusting PID control strategy is achieved by Simulink. The influence of the two control strategies on the dynamic performance of the system is analyzed and compared. The fuzzy PID control module is built on the Quartus II platform. The stable operation of the flywheel rotor is realized by using the EP4CE22 FPGA controller on the flywheel battery test rig. The simulation and experimental results show that the fuzzy self-adjusting PID control strategy can help to restrain the vibration of the rotor and improve the dynamic performance of the flywheel system more effectively.

**Keywords:** fuzzy control; PID control; FPGA; MATLAB/Simulink

## 0 引言

近年来,随着磁悬浮技术、电机技术、控制技术和新材料技术的进步,飞轮电池技术得到了很大的发展。与化学电池相比,飞轮电池具有储能密度大、能量密度高、使用寿命长、转换效率高、无环境污染等优点<sup>[1]</sup>。飞轮电池单独或和其他动力装置混合用于电动汽车,可以大大改善汽车的动力性能和汽车尾气的排放情况。

为了提高飞轮电池的比能量和比功率,需进一步提高飞轮的极限转速。磁悬浮轴承具有无需润滑、无接触磨损、寿命长、无污染、转速高、支撑刚度和阻尼可调等优点<sup>[2]</sup>,将磁悬浮轴承应用于飞轮电池,不仅能提高飞轮转子的极限转速,还能大大减少飞轮转子在高速旋转中的摩擦损耗,有效提高能量的利用率。

飞轮电池是一个复杂的机电综合系统,电磁力是非线性力,转速变化范围大,系统具有很强的非线性,故很难精

确定建立系统的数学模型。另外,因路况比较复杂,汽车会出现频繁的加速、刹车、转弯、上坡、下坡及车体倾斜等情况,陀螺扰动力矩和惯性力也很难准确描述。

针对磁悬浮轴承的非线性、强耦合性等特点,新的控制算法不断应用于磁轴承控制系统中。HABIB M K等<sup>[3]</sup>设计了一种自适应模糊控制应用于主动磁悬浮轴承,并进行动态仿真,仿真结果表明该控制对系统的阶跃响应有良好的改善。庞杰<sup>[4]</sup>将神经网络控制理论应用于主动磁悬浮轴承系统中,实现了转子五自由度稳定悬浮,并且在有外界冲击的情况下,仍能达到较高的控制精度。

本文采用模糊控制和PID控制相结合,开发了基于FPGA控制器的飞轮电池模糊自调整PID控制策略,根据磁悬浮轴承实际运行情况,通过模糊推理实时地调整控制参数,确保系统具有良好的动态性能。

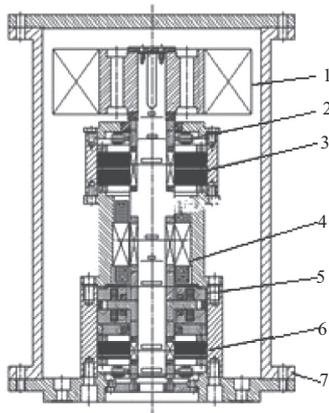
## 1 飞轮电池结构及控制原理

飞轮电池的机械结构如图1所示。飞轮转子1是能

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51275238)

**第一作者简介:**张云聪(1993—),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为磁悬浮技术。

量储存和转换的载体;电涡流传感器2主要包括上径向、下径向和轴向位移传感器,用于检测和采集飞轮转子的位移振动情况;3和6分别为上、下径向磁悬浮轴承,为飞轮转子提供径向悬浮力,限制径向( $x$ 方向、 $y$ 方向、绕 $x$ 轴的旋转和绕 $y$ 轴的旋转)4个方向的自由度;内置异步电机4外接变频器,带动飞轮转子高速旋转;轴向磁悬浮轴承5为飞轮转子提供轴向悬浮力,限制 $z$ 轴方向移动自由度;真空壳体7一方面是为了减少飞轮旋转时的风阻,减小摩擦损耗,另一方面在飞轮破坏失效时起到保护作用。



1—飞轮转子;2—电涡流传感器;3—上径向磁悬浮轴承;  
4—内置异步电机;5—轴向磁悬浮轴承;  
6—下径向磁悬浮轴承;7—真空壳体。

图1 飞轮电池机械结构图

图2为磁悬浮轴承系统控制原理图。位移传感器检测转子的位置信号 $u$ 与参考信号 $u_0$ 进行比较,得到位置偏差信号 $u_e$ 并送入数字控制器;数字控制器经过一定的控制算法后得到控制信号 $u_c$ 并送入功率放大器;功率放大器根据控制信号 $u_c$ 在相对布置的电磁铁线圈内产生相应的差动电流,进而产生差动电磁力;转子在差动电磁力作用下,回到设定的参考位置。如,当转子向下偏移时,位置偏差信号 $u_e > 0$ ,位置控制信号 $u_c > 0$ ,电磁铁1线圈内的电流为 $(I_0 + I_c)$ ,电磁铁2线圈内的电流为 $(I_0 - I_c)$ ,电磁铁1的电流大于电磁铁2的电流,电磁铁1的磁力大于电磁铁2的磁力,使转子在差动电磁力作用下回到指定参考位置。

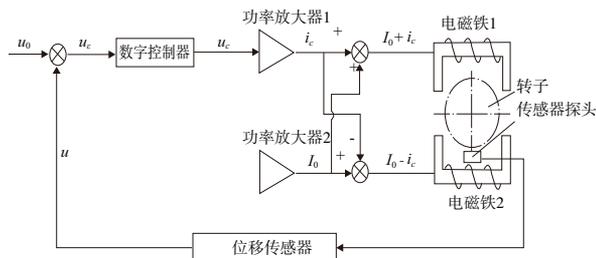


图2 磁悬浮轴承系统控制原理图

## 2 模糊控制器的设计与仿真

### 2.1 模糊控制器原理

对于磁悬浮轴承支撑的飞轮电池,由于路况复杂以及

汽车不同的运动状态,使系统很难建立精确的数学模型,控制参数的不确定,使磁悬浮轴承具有非线性、磁滞性、强耦合性。因此普通PID控制策略无法满足控制要求。模糊控制不依赖系统的精确数学模型,能实现控制参数的自调整。采用模糊控制和PID控制结合的控制策略,以飞轮电池作为控制对象,选用转子实际位置与参考位置产生的偏差 $e$ 和偏差变化率 $ec$ 为模糊控制器的输入,根据试验得到的经验建立模糊控制库,经过模糊推理后转化为PID控制的3个系数 $K_p, K_I, K_D$ 。控制原理如图3所示。

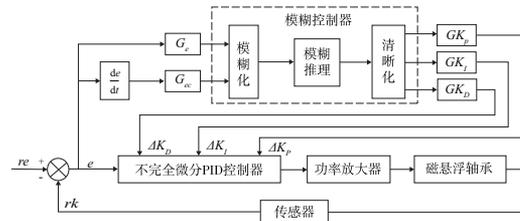


图3 模糊自调整PID控制器的工作原理

### 2.2 输入量模糊化

在本文的试验系统中,AD芯片的采样范围为 $0 \sim 5V$ ,期望值为中点 $2.5V$ ,因此选择偏差 $e$ 的基本论域为 $[-2.5, +2.5]$ ,偏差变化率 $ec$ 的基本论域为 $[-5, +5]$ 。物理论域经过量化得到输入变量模糊论域: $e, ec = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ,此时, $e$ 的量化因子为 $2.4, ec$ 的量化因子为 $1.2$ 。

输出变量模糊论域: $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

要实现变量模糊化,首先要确定模糊论域上的模糊子集以及各个模糊子集对应的隶属函数形式。一般而言,模糊论域上模糊子集个数越多,模糊控制的过程就越精细,但模糊推理过程需要的时间就越多。综合考虑,本文最终确定的输入变量和输出变量的模糊子集分别定义为NB(负大),NM(负中),NS(负小),ZO(零),PS(正大),PM(正中),PB(正大)。

隶属函数有三角形、梯形、S形、Z形等多种函数。隶属函数形状尖的子集,分辨率和控制灵敏度高;隶属函数平缓的子集,控制特性平缓,系统稳定性相对较好。本文的所有输入函数和输出函数中,NB为Z形函数,PB为S形函数,相对平缓;其余取三角形隶属函数。以变量 $e$ 为例,其模糊论域中模糊子集隶属函数分布如图4所示。

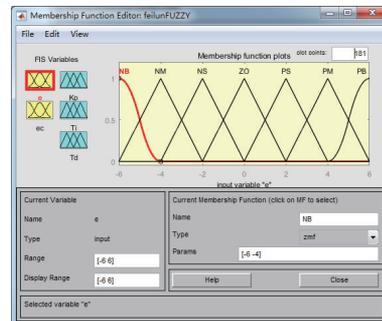


图4  $e$ 的隶属函数

### 2.3 模糊自调整控制规则

模糊控制规则是模糊控制器设计的核心工作,建立模糊控制规则常用的方法是根据设计人员的技术和实际经验归纳总结出来的。根据控制参数调试经验,归纳总结了  $K_p$ 、 $K_I$  和  $K_D$  在不同  $e$ 、 $ec$  组合情况下变化的规则如下:

1) 当  $|e|$  较大时,此时需要提升系统反应速度,即增大  $K_p$ ,因为积分环节主要对稳态精度影响较大,此时可以不用积分环节,使  $K_I$  趋向 0,  $K_D$  要变小。

2) 当  $|e|$  较小时,转子接近平衡位置,此时需要优先增强积分作用,即增加  $K_I$ ,进一步提高控制精度,同时应该适当增加  $K_p$  提升转子支撑刚度,为避免系统在平衡点处出现振荡,  $K_D$  的取值应恰当。

3) 当  $|e|$  和  $|ec|$  都适中时,为了使系统不产生较大的超调量,此时应适当减小  $K_p$ ,为了使位移尽快收敛,需要稍微增强积分作用,即增加  $K_I$ ,  $K_D$  取值适中。

根据上述自整定规则和实际试验,最终确定 PID 3 个控制参数的模糊控制规则表,其中  $\Delta K_p$  的规则如表 1 所示。

表 1  $\Delta K_p$  的模糊规则

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PS	ZO	NS
NM	PB	PB	PM	PM	ZO	NS	NM
NS	PB	PM	PM	PS	NS	NM	NB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	NB
PS	NB	NM	NS	PS	PM	PM	PB
PM	NM	NS	ZO	PM	PB	PB	PB
PB	NS	ZO	PS	PB	PB	PB	PB

在 MATLAB 的模糊规则编辑器 (rule editor) 里将  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$  控制规则用模糊条件语句 (if...then 结构) 进行描述,  $e$ 、 $ec$  的组合用“and”, 因为  $e$ 、 $ec$  各有 7 个模糊子集, 所以会有  $7 \times 7$  种模糊条件语句, 具体如图 5 所示。



图 5 模糊规则编辑器  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$  中的控制规则

### 2.4 清晰化模块

模糊控制器的输出为模糊量, 需要把模糊量转化为清晰量, 才能用于控制执行机构。常用的清晰化方法有二等分法 (bisector)、面积重心法 (centroid)、中间最大值法 (mom) 等。本文选用面积重心法进行清晰化处理。设论域  $U$  上集合  $A$  的隶属函数为  $A(u)$ , 精确输出量  $u_{cen}$  由计算公式 (1) 求出:

$$u_{cen} = \frac{\int_U A(u) u du}{\int_U A(u) du} \quad (1)$$

在 MATLAB 模糊逻辑工具箱的去模糊化 (defuzzification) 选项设置为面积重心法。

### 2.5 系统仿真研究

根据系统各环节的数学模型, 利用 MATLAB/Simulink 基本模块和模糊逻辑控制器 (fuzzy logic controller) 模块搭建系统模型, 分别对不完全微分 PID 控制和模糊自调整 PID 控制进行仿真研究, 比较两种控制策略的优劣。选取两种控制策略初始控制参数一致, 控制参数由仿真结果和实际调试确定。在  $t=0.25s$  时加入一个幅值为  $0.3V$  的脉冲激励信号。图 6 为不完全微分 PID 控制和模糊自调整 PID 控制策略仿真图, 图 7 为仿真结果曲线。

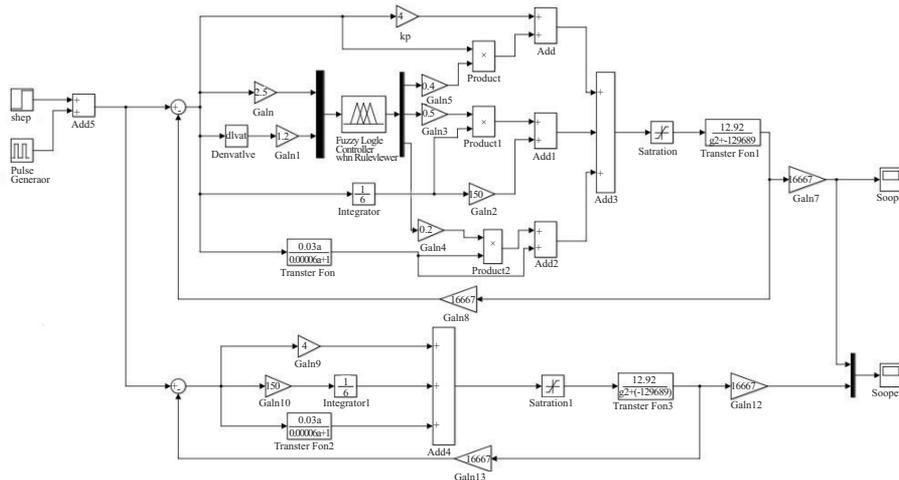


图 6 两种控制策略系统仿真图

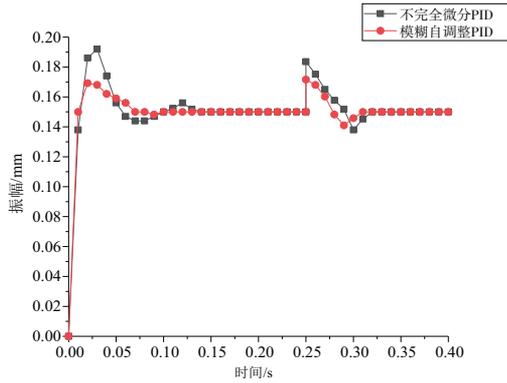


图7 两种控制策略仿真曲线

表2是两种控制策略下的振动随时间变化的仿真曲线。由表2可知;模糊自调整PID调节时间更短,超调量更小,在起浮和外界激励下控制效果优于不完全微分PID。

表2 两种控制策略下的振动对比

参数	起浮		脉冲激励	
	不完全微分PID	模糊自调整PID	不完全微分PID	模糊自调整PID
调节时间/s	0.14	0.10	0.06	0.05
超调量/%	24.0	12.0	22.4	14.4

表3 AD7938控制寄存器位含义

寄存器位	DB11	DB10	DB9	DB8	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
含义	PM1	PM0	CONDIG	REF	ADD2	ADD1	ADD0	MODE1	MODE0	SHDW	SEQ	RANGE

### 3.2 模糊PID控制模块

模糊PID控制模块主要包括误差生成模块、模糊量化模块、模糊查找表模块和PID运算模块。

误差生成模块是将AD模块采集到的位移信号rk与参考信号refer作比较,获得误差信号e和误差变化率信号ec,其中参考信号refer放在FPGA内部寄存器中。误差生成模块RTL级映射如图9所示。

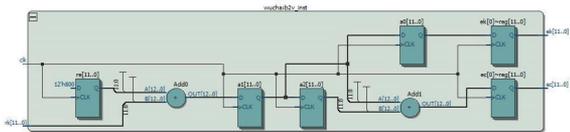


图9 误差生成模块RTL级映射

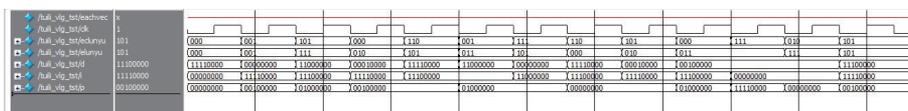


图10 模糊查找表模块测试仿真图

PID运算模块是将不完全微分PID与模糊控制结合的过程。不完全微分PID控制器的传递函数可表示为:

$$G(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{K_i s} + \frac{K_d s}{1 + T_f s} \right) \quad (2)$$

### 3 模糊控制器软件设计

本文模糊控制策略的实现主要包括AD转换模块,模糊PID控制模块,电流PI控制模块和PWM模块,其流程图如图8所示。

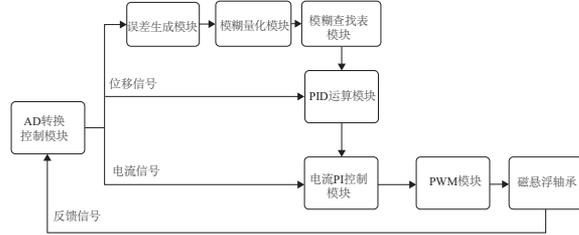


图8 模糊自调整PID流程图

#### 3.1 AD转换控制模块

AD转换控制模块主要是控制AD芯片数据的读写操作、通道的选择和数据传输形式。DB0-DB11为双向I/O口,DB[11..0]为输入口时,接受AD芯片转换后的数据并送入后续的处理模块;DB[11..0]为输出口时,数据输出给AD7938的12位控制寄存器位,控制AD芯片的工作方式。表3为各寄存器位对应的含义。

模糊量化模块是将误差信号e和误差变化率信号ec进行模糊化处理得到模糊量的过程。在本模块中,误差e和误差变化率ec的模糊量化与MATLAB中的模糊子集和隶属函数的选取一致,最终模糊量化后的值为{111,110,101,000,001,010,011}。

模糊查找表模块主要是实现模糊推理和解模糊的过程。本文借助MATLAB模糊逻辑工具箱,按照一定的规则生成查找表并存储在rom中,以误差e和误差变化率ec模糊量化后的值为地址,通过查找方式得到 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  3个参数。考虑转子旋转时,主要振动来源为转子不平衡量所引起的周期性振动,以转子旋转时转子实际位置与参考信号产生的偏差e和偏差变化率ec作为测试信号,得到此模块的仿真图如图10所示。

式中: $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 分别是比例、积分和微分环节的增益; $T_f$ 为滤波时间常数。

为了对不完全微分PID控制算法编程,采用一阶向后差分方法对各环节进行离散化,得到离散PID,将 $\Delta K_p$ 、

$\Delta K_I, \Delta K_D$  3 个参数经过一定运算处理得到  $\Delta K_{p\_1}, \Delta K_{I\_1}, \Delta K_{D\_1}$ , 加入到 PID 控制环节, 构成模糊 PID 控制, 各环节输出如下:

$$\text{比例环节: } U_p(k) = (K_p + \Delta K_{p\_1}) E(k) \quad (3)$$

$$\text{积分环节: } U_i(k) = U_i(k-1) + (K_p + \Delta K_{p\_1})(K_I + \Delta K_{I\_1}) E(k) \quad (4)$$

$$\text{微分环节: } U_d(k) = (K_{d1} + \Delta K_{d\_1}) [E(k) - E(k-1)] + K_{d2} U_d(k-1) \quad (5)$$

$$\text{控制器总输出: } U(k) = U_p(k) + U_i(k) + U_d(k) \quad (6)$$

对本模块搭建顶层文件, 对顶层文件进行整体仿真, 输出仿真结果如图 11 所示。可以看出, 输出能快速响应输入, 且输出满足要求。

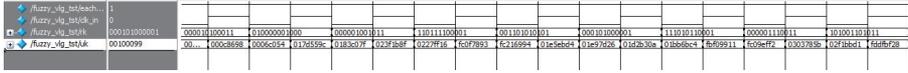


图 11 模糊 PID 模块测试仿真图

### 3.3 电流 PI 控制模块

电流 PI 控制模块是对电流信号和位移控制信号进行运算的模块。本文采用 PI 控制, 其传递函数为:

$$G_i(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{K_I S} \right) \quad (7)$$

考虑到 FPGA 内部乘法器资源宝贵, 电流控制模块采用移位方式实现比例和积分运算, 同时为了防止积分过量的问题, 采取抗饱和和积分措施, 即当电流控制量超过额定极限值时, 只计算反向偏差。

### 3.4 PWM 模块

PWM(脉冲宽度调制)无需数模转换, 可从 FPGA 直

接输出给 MOS 管, 实现 MOS 管导通时间的改变, 控制磁轴承电流的变化。在 FPGA 内部, 利用线性计数器和比较器产生 PWM 波形。电流控制模块输出的控制量与计数器的值作比较, 当控制量大于计数器的值时输出高电平, 反之, 输出低电平, 控制量的不同实现 PWM 波形占空比不同。通过改变计数器循环频率改变 PWM 波形的频率, 考虑到实际系统的需要及功率器件的寿命, 本文设定的 PWM 的频率为 25 kHz。

在 Modelsim 软件里对本文 PWM 模块仿真, 仿真结果如图 12, 可以看出 PWM 波形频率为 25 kHz, 随着输入的改变, 输出的占空比跟着改变, 且波形无毛刺、平滑, 满足设计要求。

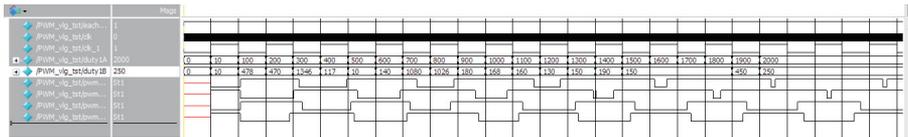


图 12 PWM 模块测试仿真图

在 Quartus II 中采用自顶向下的设计方法, 在顶层进行系统的模块划分和设计, 然后用 Verilog HDL 语言和原理图结合的方法进行电路设计, 最终得到飞轮电池 FPGA 五自由度模糊控制系统顶层结构图。将其下载到某公司的 Cyclone IV 系列中的 EP4CE22E22C8 芯片的电路板上进行试验。

## 4 系统高速运行试验

图 13 为飞轮电池试验系统实物图。飞轮电池试验系统主要包括飞轮电池机械系统、磁悬浮轴承电控系统、变频器、PC 机、示波器和数据采集系统。



图 13 飞轮电池试验系统实物图

机械系统包括飞轮转子、径向磁悬浮轴承、轴向磁悬浮轴承、电机定子等, 是能量转换的载体; 电控系统包括传感器、控制器和功率放大器, 是本系统的核心, 其性能的好坏对飞轮转子精度具有决定性作用。变频器驱动电机定子带动飞轮转子高速旋转; PC 机用来编写调试程序并通过下载线与数字控制器相连, 将编写的程序烧写进 FPGA; 示波器用来观察转子各自由度的位移信号和电流信号的变化, 数据采集系统用来采集转子振动信号进行频谱分析。

试验分两组进行, 一组采用不完全微分 PID 控制策略, 一组采用模糊 PID 控制策略, 两组初始控制参数完全一样, 如表 4 所示。

表 4 两种控制策略初始控制参数

参数	上径向	下径向	轴向
$K_p$	1.9	2.1	1.8
$K_I$	14	14	14
$K_D$	132	132	150
$T_f$	0.000 6	0.000 6	0.000 6

(下转第 157 页)

因此,证实并联机械手手爪运动范围与理论分析保持一致。

### 4 结语

针对目前易拉罐罐装饮品智能生产线上生产效率的问题,提出并设计了一种在一定的平面范围内自由移动的并联机械手。运用两自由度并联机构平面平动设计原理,完成了并联机械手总体结构设计,对各零部件进行了三维建模,并对其进行运动仿真和仿真验证。通过运动仿真表明:该并联机械手手爪运动范围与理论分析保持一致,为并联机械手运动的研究提供了一定的理论基础。

#### 参考文献:

[1] 张小航. PLC的二自由度并联机械手设计[J]. 绍兴文理学院学报,2017,37(7):47-50.

[2] 梁宏宝,夏飞,韩东. 五自由度移动机械手的动力学建模与仿真[J]. 机械制造与自动化,2018,47(6):112-114,146.

[3] 李雪鹏. 两种含平面分支六自由度并联机构理论研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2014.

[4] 黄田,李滕,李占贤. 仅含转动副的二自由度平动并联机器人

机构:中国,01145160.2[P]. 2002-06-26.

[5] 王冰,魏志辉,聂旭萌,等.一种平面二自由度并联机器人承载能力分析[J]. 机床与液压,2015,43(12):105-109.

[6] WAHLE M, CORVES B. Stiffne analysis of Clave1's DELTA robot[C]. International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Berlin: Springer, 2011:240-249.

[7] M.A.Nahon, T. Ropponen. Optimization of dynamic forces in mechanical hands[J]. Journal of Mechanical Design, 1991,113:167-173.

[8] CHEN Y Y, HAN X Z, GAO F. et al. Workspace analysis of a 2-DOF planar parallel mechanism[C]. International Conference of Electrical, 2015:192-194.

[9] 艾青林,祖顺冲,胥芳. 并联机构运动学与奇异性研究进展[J]. 浙江大学学报(工学版),2012,46(8):1353-1354.

[10] 李忠慕. 纽扣自动冲压组装台异形零件夹持装置设计[D]. 广州:广东工业大学,2014.

[11] 王冰,田东兴,韩文仲. 平面2自由度并联平动机器人理论工作空间分析[J]. 机床与液压,2010,38(5):111-112.

收稿日期:2019-04-10

(上接第 153 页)

变频器驱动电机带动飞轮转子由静止稳定运行至额定转速 12 000 r/min,借助数字采集卡及本实验室开发的磁悬浮数据采集虚拟仪器,采集两组试验中上径向各转速下转子振动情况,得到转子的同频振幅曲线,如图 14 所示。

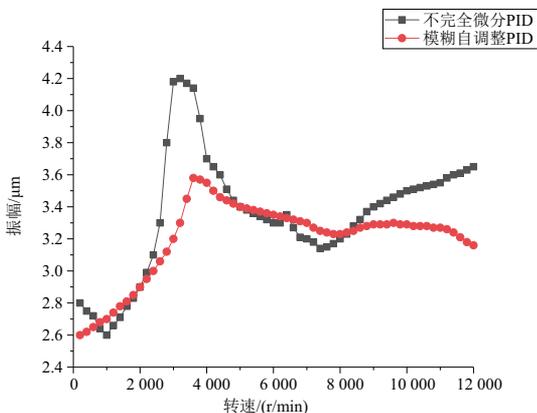


图 14 模糊自调整 PID 与 PID 同幅曲线对比

从图 14 可以观察到,在两种控制策略下,飞轮转子的临界转速在 3 200 r/min 左右。在模糊自调整 PID 控制下,转子振幅为 3.6 μm,相比较不完全微分 PID 控制,转子振幅降低了 16%,且变化平坦,有利于转子安全越过临界转速;在工作转速 12 000 r/min 附近,模糊自调整 PID 控制策略转子振幅为 3.1 μm,比不完全微分 PID 控制降低 14%;在全转速范围内,模糊自调整 PID 控制振幅变化平坦。

### 5 结语

利用 MATLAB 模糊逻辑工具箱设计了模糊控制器,采用 Simulink 实现了模糊自调整 PID 控制策略仿真;利用 FPGA 芯片实现了数字模糊 PID 控制器。

在 Quartus II 平台编写了模糊控制算法,在飞轮电池试验台对该算法进行验证,并与不完全微分 PID 控制作比较。试验结果表明,该控制算法能在线调整控制参数,对转子在临界转速的振动有较好的抑制作用,最大振幅为 3.6 μm;在额定工作转速下转子振幅为 3.1 μm;在飞轮转子旋转过程中振幅变化平坦,具有更好的动态性能。

#### 参考文献:

[1] NGUYEN T D, TSENG K J, ZHANG S, et al. A novel axial flux permanent-magnet machine for flywheel energy storage system: design and analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9):3784-3794.

[2] 胡业发,周祖德,江征风. 磁力轴承的基础理论与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006:4-12.

[3] HABIB M K, INAYAT HUSSAIN J I. Control of dual acting magnetic bearing actuator system using fuzzy logic[C]// IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Proceedings, IEEE Xplore, 2003, 1:97-101.

[4] 庞杰. 基于神经网络主动磁悬浮轴承的控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.

收稿日期:2018-12-14